

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кулаковський Леонід Ярославович

УДК 662.641.047:504.062.2

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОГО
КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ НА ТОРФОБРИКЕТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

Спеціальність 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

Розен Віктор Петрович,

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Міністерства освіти і науки України, (м. Київ),
зав. кафедри автоматизації та управління електротехнічними
комплексами

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Дубовський Сергій Васильович,

Інститут технічної теплофізики НАН України (м. Київ),
провідний науковий співробітник відділу теплофізичних
основ енергоощадних технологій

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Малярєнко Олена Євгенівна,

Інститут загальної енергетики НАН України (м. Київ),
зав. відділу ефективності енерговикористання та оптимізації
енергоспоживання

Захист відбудеться «11» квітня 2017 р. о 14 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, буд. 115, корп. 22, ауд. 316.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України за адресою: 03680, м. Київ, проспект Перемоги, 56.

Автореферат розіслано «___» березня 2017 р.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради

А.М. Ковальчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема енергозбереження як діяльність, спрямована на раціональне використання енергії та природних енергетичних ресурсів, набула особливої гостроти і актуальності після здобуття Україною незалежності. За даними "Енергетичної стратегії України на період до 2030 року", у 2005 р. промисловість споживала 54,5% імпортованих енергоресурсів, а в 2030 р. Україна повинна бути забезпечена власними енергоресурсами на 88,3%. Основним чинником підвищення рівня енергетичної незалежності та ефективності функціонування паливно-енергетичного комплексу України може бути зниження енерговикористання шляхом реалізації заходів з енергозбереження, збільшення видобутку, перероблення власних енергоресурсів і зменшення витрат енергії на дані процеси.

Одним із найбільш перспективних у використанні в житлово-комунальному господарстві паливних ресурсів України є торф. Згідно з Концепцією розвитку торф'яної промисловості України, до 2030 року виробництво торф'яних брикетів повинно зрости з 500 тис. т у 2015 р. до 1,0 млн т на рік. Збільшення виробництва торфобрикетів повинно супроводжуватись вирішенням завдання щодо зниження питомих енерговитрат на виробництво торфобрикетів.

Основні витрати енергії (до 80%) у виробництві паливних брикетів пов'язані зі штучним сушінням у заводських умовах. Застосування ручного регулювання параметрів сушіння кускового органічного палива, такого як торф і буре вугілля, та суб'єктивність у визначенні необхідних режимів роботи обладнання призводять до високих витрат енергоносіїв, низької продуктивності процесу, його пожежонебезпеки. Відсутність адекватного математичного опису технології сушіння цих копалин в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою, адекватних описів факторного поля та окремих факторів, неврахування всіх важливих збурюючих впливів на процес сушіння призводять також до погіршення якісних характеристик сушенки, а в подальшому – отримання брикетів незадовільної якості, зростання собівартості сушіння.

Отже, формування методів підвищення ефективності використання енергоресурсів енерготехнологічним комплексом сушіння твердих паливних корисних копалин за рахунок оптимального використання теплової та електричної енергії, необхідної для отримання сушенки регламентованої якості, є важливою **науковою задачею**, вирішення якої дозволить підвищити ефективність функціонування брикетних заводів.

З метою розроблення методів підвищення ефективності використання енергоресурсів енерготехнологічним комплексом сушіння і для формування енергоефективного регулювання даним процесом проведено експериментальні дослідження, математичне моделювання та оптимізацію значень керуючих параметрів торфобрикетного виробництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматизації та управління електротехнічними комплексами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до напрямку «Енергетика та енергоефективність» Закону України № 2519-IV від 09.10.2010р.

“Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки”, Комплексній програмі НТУУ «КПІ» «Енергетика сталого розвитку». Матеріали дисертаційної роботи використано під час виконання НДР кафедри автоматизації управління електротехнічними комплексами «Розробка методів та засобів діагностування ефективності стаціонарних установок для створення системи енергоменеджменту гірничодобувних підприємств» ДР №0115U002333.

Мета і задачі дослідження.

Мета роботи – зниження енерговитрат енерготехнологічним комплексом сушіння торфу з використанням парової трубчастої сушарки шляхом регулювання режимних параметрів процесу сушіння за критерієм енергетичної ефективності з дотриманням якісних характеристик сушенки та вимог пожежобезпеки.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

1. Сформулювати та провести аналіз факторного поля енерготехнологічного процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці, який впливає на режим роботи та її енергоефективність;
2. Здійснити планування і проведення активних виробничих експериментів на об’єкті моніторингу та їх статистичний і кореляційний аналіз;
3. Знайти цільові функції енерготехнологічного процесу сушіння торфу, що описують факторне поле цього процесу;
4. Побудувати багатомірну модель споживання енергії, що дозволяє здійснити знаходження енергоефективних режимів сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою за фактичними фізико-механічними властивостями торфу, з дотриманням вимог щодо якості сушенки;
5. Розробити нейронну мережу знаходження енергоефективних керуючих параметрів процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою;
6. Провести класифікацію та розпізнавання виробничих ситуацій енерготехнологічного процесу сушіння торфу та сформулювати алгоритм проведення регулювання цього процесу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою в енергоефективних режимах в межах відповідного класу, що дозволить здійснити оптимізацію енерготехнологічного процесу сушіння як однієї із систем виробництва торфобрикетів.

Об’єкт дослідження: енерготехнологічний процес сушіння торфу в парових трубчастих сушарках.

Предмет дослідження: режимні параметри енерготехнологічного процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках.

Методи дослідження. Науково-методичну основу виконаних досліджень склали:

- методи планування активних експериментів для проведення експериментальних досліджень режимів роботи енерготехнологічного комплексу сушіння з необхідною оптимальною кількістю серій дослідів;
- метод експертних оцінок для визначення факторів та параметрів енерготехнологічного процесу сушіння вологого твердого палива, що мають вплив на технічні та енергоекономічні показники процесу сушіння;

- метод групового урахування аргументів (МГУА) з використанням комбінаторного та багаточасового ітераційного алгоритму генерування моделей та метод еволюції груп адаптивних моделей для побудови математичних моделей режиму роботи енерготехнологічного комплексу сушіння торфу з паровою трубчастою сушаркою;
- симплексний метод для знаходження оптимальних значень керуючих впливів, що забезпечують мінімальне споживання теплової та електричної енергії для кожного із серії виробничих експериментів;
- метод Монте-Карло для генерації даних необхідних для навчання нейромережі знаходження значень енергоефективних керуючих параметрів роботи енерготехнологічного комплексу сушіння з паровою трубчастою сушаркою;
- метод дискримінантного аналізу для розпізнавання виробничих ситуацій енерготехнологічного процесу сушіння торфу.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено математичну модель оптимізації енерготехнологічного процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках за критерієм енергоефективності, яка відрізняється тим, що в якості вихідних параметрів окрім параметрів якості сушенки та пожежобезпеки в модель включено показники електроспоживання та теплоспоживання.

2. Вперше запроваджено та використано поняття оцінки невходження параметрів процесу сушіння торфу в математичну модель цільової функції, визначення якого за запропонованим у роботі алгоритмом дозволило вибрати оптимальний метод навчання моделі роботи енерготехнологічного комплексу сушіння, отриманої методом еволюції груп адаптивних моделей, який дозволив отримати функції цілей процесу сушіння торфу з параметрами, що спричиняють найбільший вплив на кожну з визначених цільових функцій.

3. Вперше для енерготехнологічного процесу сушіння кускового органічного палива, на прикладі торфу, розроблено метод вибору режимних параметрів сушіння торфу фактичних фізико-механічних властивостей торфу за необхідної продуктивності сушарної установки, які забезпечують отримання якісної сушенки з мінімальними витратами енергії.

4. Вперше для енерготехнологічного процесу сушіння кускового органічного палива, на прикладі торфу, запропоновано виконувати класифікацію, розпізнавання виробничих ситуацій та здійснювати керування процесом за режимними параметрами, які відповідають необхідним класам ситуацій, що дозволяє управляти процесом з урахуванням його інерційності та зменшує ймовірність отримання неякісної сушенки.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що проведені в роботі дослідження дозволили отримати нове вирішення актуальної задачі енергоефективного сушіння кускового органічного палива, на прикладі торфу, енерготехнологічним комплексом сушіння з використанням парової трубчастої сушарки. Розроблені методи і алгоритми використано для ефективного керування енерготехнологічним комплексом сушіння торфу в умовах зміни фізико-механічних властивостей сировини, що надходить в сушарну установку. На основі результатів наукових досліджень оптимізовано параметри енерготехнологічного процесу

сушіння торфу, що забезпечують мінімальне споживання енергії та отримання якісної сушенки за існуючих технологічних обмежень регулювання процесу, та здійснено апаратну реалізацію методу знаходження цих параметрів на програмованих логічних інтегральних схемах.

Математичні моделі процесу сушіння та процедура здійснення управління процесом в енергоефективних режимах були враховані у плані робіт з оптимізації споживання енергії на торфобрикетному заводі «Сойне». Процедура пошуку режимів роботи сушарного комплексу за мінімальних витрат енергії та процедура здійснення регулювання процесом сушіння матеріалу в енергоефективних режимах застосовуються ТОВ «НВП «Горизонт»» для формування заходів з енергозбереження та оптимального управління енергоспоживанням підприємств, що використовують енерготехнологічний комплекс сушіння з паровими трубчастими сушарками в технологічній стадії виробництва.

Особистий внесок здобувача. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: побудовано факторне поле процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою [2]; запропоновано метод вирішення багатомірної задачі оптимізації споживання енергії енерготехнологічним комплексом сушіння за допомогою методу уступок [1]; запропоновано структуру нейронних мереж, що дозволяє здійснити знаходження оптимальних керуючих впливів за фактичних збурюючих параметрів енерготехнологічного процесу сушіння торфу [3]; побудовано факторне поле процесу сушіння піску в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою [4]; здійснено аналіз факторів, які впливають на процес сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою [5]; розроблено процедуру вибору адекватної математичної моделі, знайденої за різними алгоритмами навчання методу еволюції груп адаптивних моделей [6]; запропоновано метод керування процесом сушіння торфу за допомогою класифікації та розпізнавання виробничих ситуацій, що дозволяє отримати сушенку необхідної якості за мінімальних витрат електричної енергії [8]; розроблено план активних виробничих експериментів процесу сушіння торфу за умов функціонування сушарної установки [9]; запропоновано метод визначення факторів, які впливають на процес сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою, що включає відбір факторів за допомогою експертного оцінювання анкет фахівців торф'яної галузі та з використанням нейронних мереж [10]; побудовано цільові функції моделі процесу сушіння торфу за допомогою комбінаторного та багатопарового ітераційного алгоритму методу МГУА [11].

Апробація результатів наукових досліджень.

Основні результати роботи доповідались на: XIX науково-технічній конференції “Енергетика: Эффективность, надежность, безопасность”, м. Томськ, Російська Федерація, 2013 р.; III Міжнародній науковій конференції молодих вчених “Енергетика та системи керування: ЕРЕС-2013”, м. Львів, 2013 р.; II Міжнародній науково-практичній конференції “Енергетична безпека навколишнього середовища”, м. Луцьк, 2013 р.; Міжнародній науково-технічній конференції викладачів, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та

побутових об'єктів», м. Донецьк, 2013 р.; науково-технічному семінарі – «1st TMCC Winter Workshop-2015» in Telemark University, м. Порсгрун, Норвегія, 2015р. ; на 56-й конференції по Симуляції та Моделюванню (56th Conference on Simulation and Modelling – «Modelling, Simulation and Optimization»), м. Лінчюпінг, Швеція, 2015 р.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 11 наукових працях, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях України, з них 2 внесені до міжнародних наукометричних баз даних, одній закордонній статті та чотири тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота містить вступ, чотири розділи, висновки, список літератури та 14 додатків. Робота містить 162 сторінки основного друкованого тексту, 21 рисунок, 17 таблиць, список літератури із 178 найменувань та додатки на 61 сторінці. Загальний обсяг дисертації – 262 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, зазначено її зв'язок з науковими програмами, темами. Визначено мету та основні задачі дослідження. Наведено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, апробацію роботи і публікації.

У **першому розділі** визначено, що одним із найбільш енергоємних комплексів у виробництві паливних брикетів, що визначає їх якість, є енерготехнологічний комплекс сушіння. В сушарних комплексах, що використовуються на заводах з брикетування торфу та бурого вугілля, а також підсушування кам'яного вугілля для спалювання на теплових електричних станціях широкого застосовування набула парова трубчаста сушарка, яка застосовується також для сушіння органічних речовин, пластмас, крохмалю тощо. Вона є зручною для регулювання енерготехнологічного процесу сушіння, але має великі затрати енергії на даний процес за високих вимог щодо якості сушенки. Це основні причини для вибору процесу сушіння матеріалів, зокрема торфу, в енерготехнологічному комплексі з паровою трубчастою сушаркою як об'єкту досліджень.

Здійснено аналіз перспектив нарощування виробництва торфобрикетів, наведено основні переваги використання фрезерного торфу як палива для підприємств комунальної теплоенергетики. Видобуток торфу для палива та добрив в Україні у 2020 році заплановано в обсязі 4-5 млн т на рік згідно «Концепції розвитку торф'яної промисловості України до 2030 року». Встановлено, що «Плани заходів з реалізації Стратегії регіонального розвитку» північно-західних областей України передбачають заміщення природного газу місцевими альтернативними видами палива, зокрема торфобрикетами. З проведеного аналізу стану та перспектив розвитку теплової енергетики Рівненської області зроблено висновок, що в цій області впроваджуються заходи щодо скорочення споживання теплової енергії (зокрема підвищення енергоефективності виробництв), будівництво нових котелень та переведення застарілих на альтернативні місцеві види палива (зокрема торфобрикет). Це в свою чергу зумовлює необхідність запроваджувати заходи з підвищення енергоефективності виробництва торфобрикетів.

Робота енерготехнологічного комплексу сушіння торфу згідно із існуючими режимними картами регламентує отримання сушенки необхідної якості, однак

режими сушіння не завжди є енергоефективними. Вирішення задач підвищення енергоефективності процесу потребує створення його адекватного математичного опису. Подальше моделювання дозволило виявити не лише основні впливи, але й оптимізувати процес за режимами роботи сушарки. Встановлено, що для побудови адекватної моделі енерготехнологічного процесу сушіння торфу необхідно визначити фактори, які суттєво впливають на процес сушіння, тобто вирішити задачу «відбору ознак» та здійснити ідентифікацію процесу за експериментальними даними. Аналіз основних методів дослідження складних об'єктів дозволив вибрати метод групового урахування аргументів для вирішення даних задач. Встановлено, що для побудови системи регулювання енерготехнологічного процесу сушіння торфу найбільш доцільно використовувати багатошаровий перцептрон як модель з можливостями екстраполяції, в меншій мірі чутливої до збільшення числа вхідних впливів, що є важливим для моделей багатфакторного об'єкту. Результати аналізу дозволили сформулювати задачі, що були досліджені в дисертаційній роботі.

У другому розділі проведено аналіз технології, наведено характеристики об'єкту дослідження та факторів, які впливають на режим роботи. За результатами аналізу побудовано причинно-наслідкову модель енерготехнологічного процесу сушіння торфу за схемою Ісікава (рис. 1).

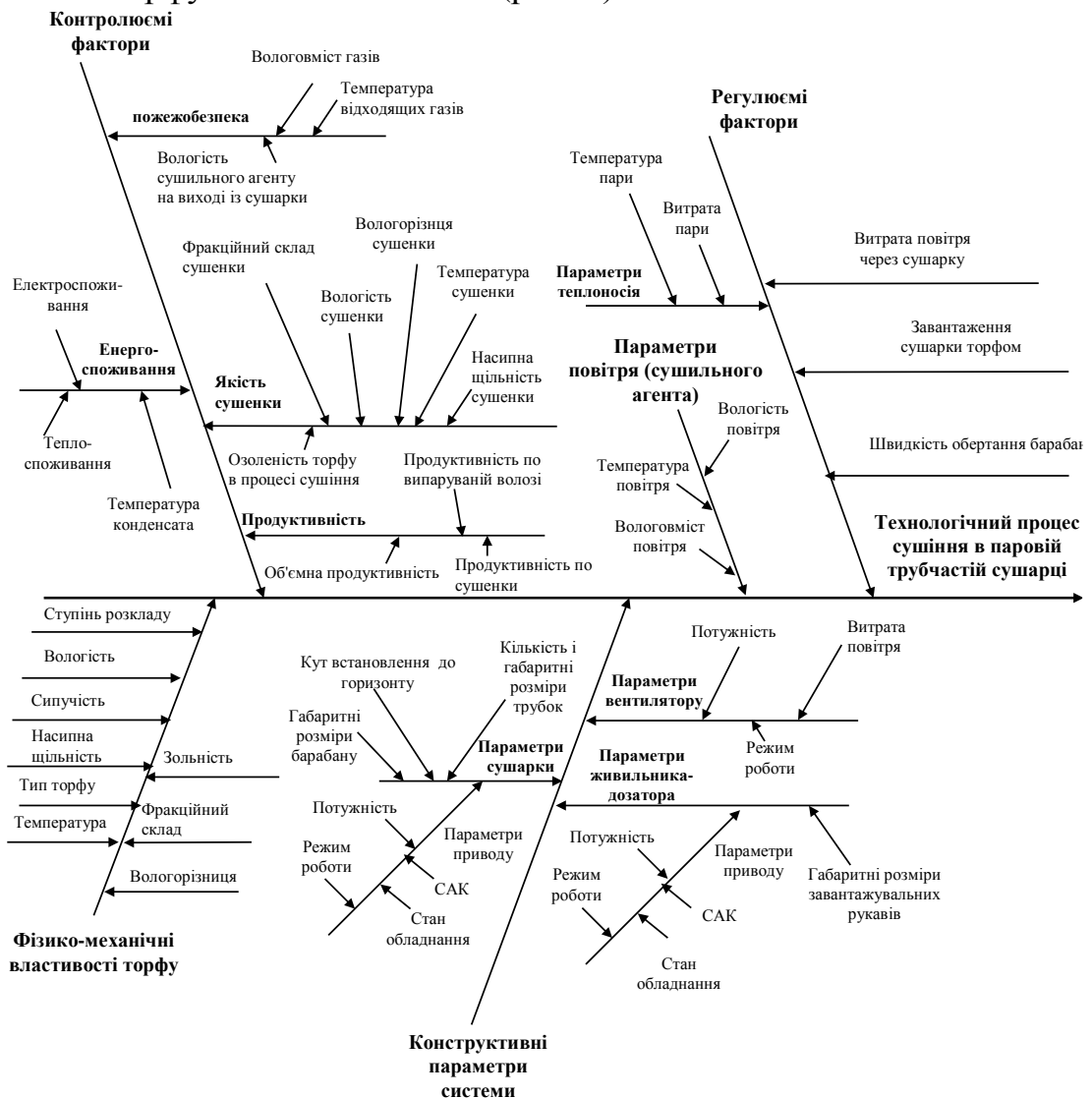


Рис. 1. Структура факторного поля енерготехнологічного комплексу сушіння

Діаграма відображує основні структурні зв'язки всередині системи, дозволяє наочно представити ієрархію факторів та визначити структуру параметрів, які суттєво впливають на роботу енерготехнологічного комплексу сушіння з паровою трубчастою сушаркою.

Методом експертних оцінок визначено коефіцієнти ваги параметрів технології, що дозволило виключити змінні, які суттєво не впливають на процес. З урахуванням оцінок експертів та специфіки виробництва для сушіння торфу визначені параметри наведені в табл. 1 та на рис. 2.

Таблиця 1

Опис параметрів процесу сушіння торфу

Пара-метр	Значення	Од. вимі-ру	Пара-метр	Значення	Од. вимі-ру
X ₁	швидкість обертання шнека	об/хв	F ₆	сипучість торфу	°
X ₂	швидкість обертання барабана	об/хв	F ₇	фракційний склад торфу	мм
X ₃	температура пари	°С	F ₈	вологорізниця торфу	%
X ₄	витрата повітря через сушарку	м ³ /год	Y ₁	вологість сушенки	%
F ₁	вологість торфу	%	Y ₂	вологорізниця сушенки	%
F ₂	насипна щільність торфу	кг/м ³	Y ₃	температура сушенки	°С
F ₃	зольність торфу	%	Y ₄	електроспоживання	кВт
F ₄	температура торфу	°С	Y ₅	температура відходящих газів	°С
F ₅	температура повітря	°С	Y ₈	теплоспоживання	МДж

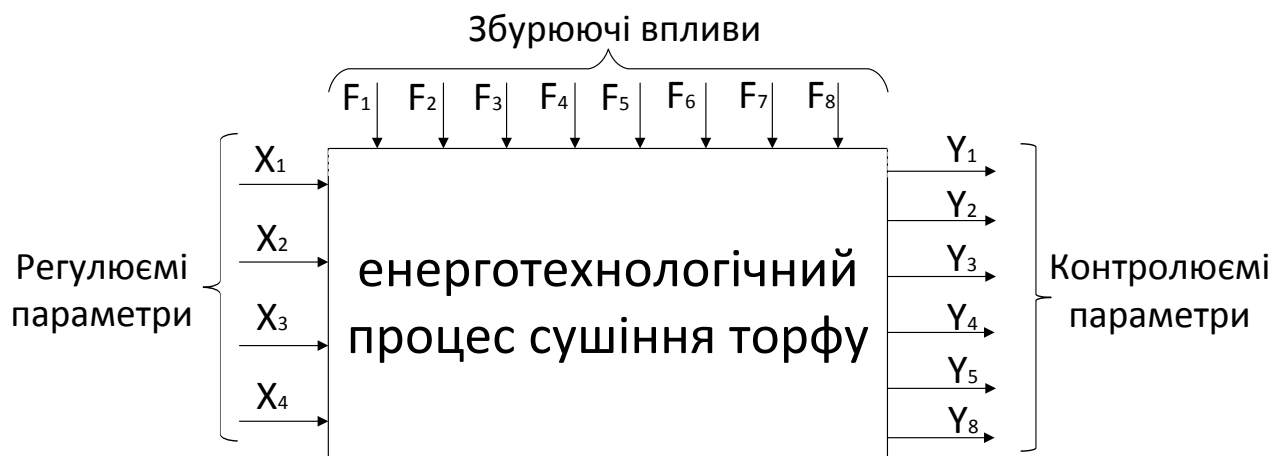


Рис. 2. Функціональна модель процесу сушіння торфу

Для отримання математичних моделей техніко-економічних параметрів за різними значеннями керуючих факторів і збурюючих впливів, на торфобрикетному заводі “Сойне” у с. Прилісне Волинської області, де виробляється близько 30% торфобрикетів України, і на якому використовується парова трубчаста сушарка, були проведені натурні експерименти. План проведення активних виробничих експериментів у енерготехнологічному комплексі з використанням парової трубчастої сушарки торфу наведено в табл. 2. Позначка експерименту (-1) – означає мінімальний, (1) – максимальний, 0 – середній рівень встановлення керуючого параметра за деякими величинами збурюючих впливів у межах значень, визначених за режимною картою.

План проведення активних виробничих експериментів
у паровій трубчастій сушарці торфу

№	X_1	X_2	X_3
1	0	0	0
2	+1	0	+1
3	+1	-1	0
4	-1	0	-1
5	-1	+1	0
6	0	+1	-1
7	0	-1	+1

Для оцінювання достовірності результатів експериментів і взаємозв'язку вхідних і вихідних показників процесу сушіння торфу було проведено статистичні аналізи. Коливання коефіцієнта варіації збурюючих впливів (понад 35 %) вказує на їх значну зміну та необхідність компенсації їх впливу в системах регулювання паровими трубчастими сушарками.

У третьому розділі розроблені математичні моделі технологічних вихідних параметрів процесу сушіння торфу. Для енерготехнологічного процесу сушіння торфу необхідно визначити взаємозв'язки вихідних параметрів Y_j від вхідних збурюючих та керуючих впливів і отримати модель типу:

$$Y_j^m = \sum_{k=1}^N \beta_{jk} \phi_k(X_1, \dots, X_4; F_1, \dots, F_8), \quad (1)$$

де β_{jk} – невідома константа, коли $\phi_k(\cdot)$ є визначеним набором базових функцій, $N=12$; при $k \in \{1, \dots, 4\}$: $\phi_k = X_k$; коли $k \in \{5, \dots, 12\}$: $\phi_k = F_k$. Похибка моделі процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках на тренувальній вибірці є сумою похибок окремих тренувальних векторів:

$$E = \sum_{j=0}^m (Y_j - D_j)^2, \quad (2)$$

де Y_j – вихідна модель y -ого вектору навчання і D_j – відповідне цільове вихідне значення системи.

Результати моделювання цільових функцій моделі комбінаторним (COMBI) та багатопаровим ітераційним алгоритмами (БІА) методу групового урахування аргументу показали, що досить важко створити адекватну модель складного об'єкту за використання лише одного методу індуктивного моделювання. Для отримання більш точних моделей, що описують процес сушіння, використано гібридні самоорганізовані нейромережі еволюційного типу – еволюції груп адаптивних моделей (англ. GAME) на основі МГУА. Мережа GAME має високу стійкість до невідповідних і зайвих ознак, підходить для коротких і зашумлених наборів даних. Це дозволило побудувати математичну модель процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці із зазначеної кількості експериментальних даних.

Мережа GAME використовує різні методи оптимізації для визначення ваги і коефіцієнтів параметрів. Серед моделей, отриманих різними оптимізаційними методами, було відібрано моделі, які найбільшою мірою задовольняють критеріям

відбору ознак, а утворені моделі при дослідженні на екстремуми дозволяють однозначно визначити мінімуми та максимуми цільових функцій енерготехнологічного процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках. Для вирішення задачі розроблено процедуру вибору адекватної математичної моделі, знайденої за різними алгоритмами навчання методу, GAME з метою знаходження оптимальних значень керуючих параметрів процесу роботи енерготехнологічного комплексу сушіння в енергоефективних режимах.

Оскільки значення середньоквадратичної похибки на контрольній вибірці у багатьох моделях відрізняється на незначну величину, вибір оптимальної моделі GAME було здійснено в два етапи:

I етап. Вибрати три найкращі моделі за значенням середньоквадратичної похибки на контрольній вибірці для кожної цільової функції. В більшості випадків найменша середньоквадратична похибка досягалась за використання градієнтних, генетичних, гібридних та об'єднані 10 алгоритмів.

II етап. Визначити змінні, які мають найменший зв'язок з цільовими функціями. Оскільки в разі використання різних алгоритмів навчання до складу математичної моделі включаються різні фактори, доцільно визначити загальну кількість значень кожного з них окремо який не входить в модель. Правильність відкидання певних факторів зі складу математичної моделі цільової функції перевірялась кореляційним аналізом результатів активних експериментів.

Для окремої моделі та кожного параметру, що не був включений до її складу, визначалась загальна кількість невходжень до окремої моделі цільової функції за різними методами навчання:

$$ОП_i = \sum_1^n П_i, \quad (3)$$

де $П_i$ – певний параметр, що не входить до складу математичної моделі окремої цільової функції; n – кількість методів навчання ($n=11$); $ОП_i$ – параметр, що не входить до окремо взятої математичної моделі.

Потім визначалась загальна кількість невходжень кожної змінної, що не належить до даної математичної моделі:

$$НВ = \sum_{i=1}^p ОП_i, \quad (4)$$

де p – кількість параметрів, що не ввійшли до математичної моделі певного методу.

Далі визначалось середньозважене значення кількості параметрів (оцінка невходження), що не ввійшли до складу моделі:

$$ОН = \frac{НВ}{p}. \quad (5)$$

Якщо значення оцінки в моделях з різними методами навчання для однієї і тієї самої цільової функції однакові, то пропонується вибирати модель з меншим значенням середньоквадратичної похибки на контрольній вибірці.

В результаті проведеного моделювання вибрано алгоритм побудови математичної моделі та отримано цільові функції процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках. Для цільової функції вологість сушенки (Y_1) було вибрано

GAME модель, побудовану з використанням квазі-Ньютонівського методу навчання мережі, для вологості сушенки (Y_2) – методу спряжених градієнтів, для температури сушенки (Y_3) – методу диференціальної еволюції, для електроспоживання (Y_4) – методу, що поєднує основні алгоритми навчання, для температури відходящих газів (Y_5) – гібридний метод навчання, для теплоспоживання (Y_8) – методу, що поєднує основні алгоритми навчання. Структуру зв'язків параметрів цільової функції Y_1 показано на рис. 3.

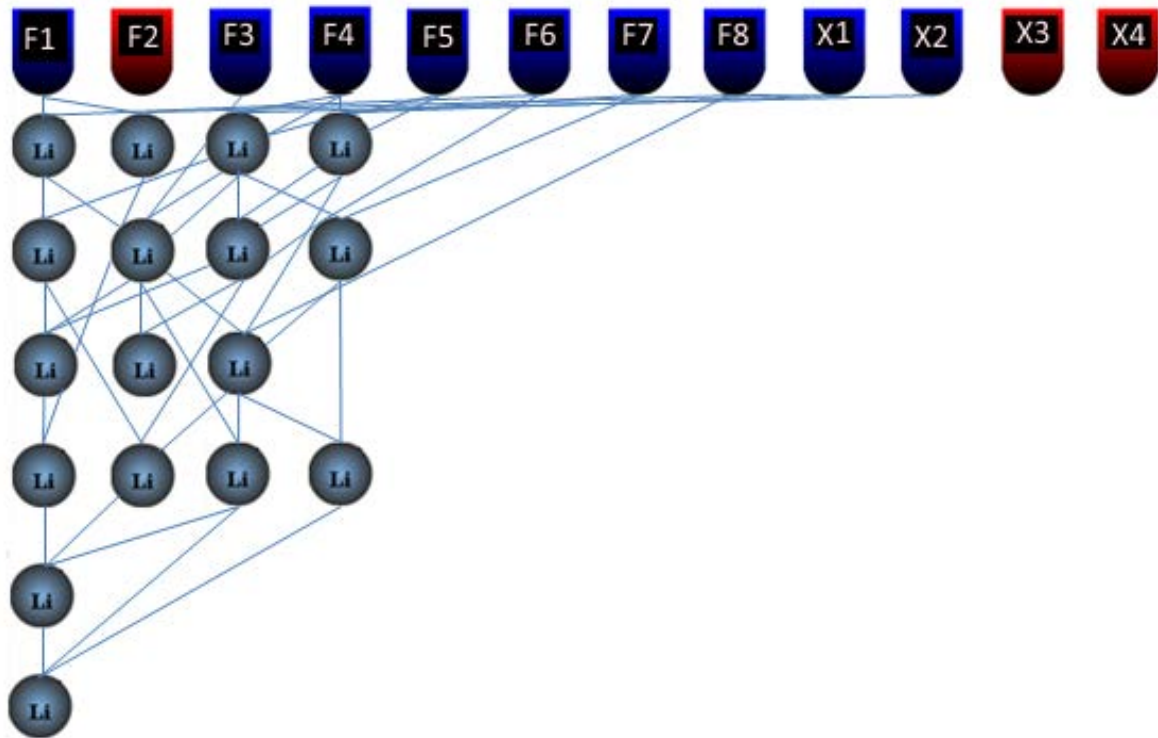


Рис. 3. Структура зв'язків параметрів цільової функції Y_1 (вологості сушенки), отриманої GAME методом

За результатом проведеного моделювання побудовано цільові функції процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках.

$$Y_1 = 0,6146F_1 - 0,4517F_3 + 0,6422F_4 + 0,483F_5 - 0,2333F_6 - 10,26F_7 + 1,186F_8 + 1,57X_1 - 1,693X_2; \quad (6)$$

$$Y_2 = 64,21 + 1,571F_1 - 0,1532F_2 - 2,137F_4 - 3,06F_7 + 17,09F_8 + 1,084F_{12} + 1,124X_1 + 1,679X_2 + 2,356X_4; \quad (7)$$

$$Y_3 = 608,2 + 1,235F_1 - 0,1552F_2 + 2,823F_5 - 4,354F_7 - 59,09F_8 + 7,84X_1 - 13,29X_4; \quad (8)$$

$$Y_4 = -315,781 - 0,2288F_1 + 0,0193F_2 + 1,004F_7 - 0,0624F_8 + 0,4966X_1 + 0,7834X_2 + 11,4723X_4; \quad (9)$$

$$Y_5 = -1,148F_1 - 0,1294F_2 + 1,961F_4 - 1,502F_5 + 1,074F_6 + 1,78F_8 - 1,782X_2 + 0,4177X_3; \quad (10)$$

$$Y_8 = -364,4F_4 - 1022F_6 + 4107X_1 - 105X_3 + 2417X_4. \quad (11)$$

Режими, що відповідають мінімальним витратам теплової та електричної енергії, визначено наступним чином. Спочатку здійснено визначення необхідної кількості теплоти для сушіння торфу певних фізичних і механічних властивостей та продуктивності сушарки, які дозволяють отримувати сушенку з необхідними якісними характеристиками. Це досягається шляхом визначення мінімальної та максимальної меж зміни витрат теплоти за одиницю часу та питомих витрат теплоти на випаровування одиниці ваги вологи з торфу певних властивостей.

Мінімум споживання електричної енергії:

$$Y_4 = -315,781 - 0,2288F_1 + 0,0193F_2 + 1,004F_7 - 0,0624F_8 + 0,4966X_1 + 0,7834X_2 + 11,4723X_4 \rightarrow \min \quad (12)$$

з обмеженнями щодо споживання теплової енергії, необхідної якості сушенки та

умов пожежобезпеки:

$$\begin{aligned} &0,6146F_1-0,4517F_3+0,6422F_4+0,4832F_5-0,2333F_6-10,26F_7+1,186F_8+1,57X_1-1,693X_2\leq 20; \\ &64,21+1,571F_1-0,1532F_2-2,137F_4-3,06F_7+17,09F_8+1,084F_{12}+1,124X_1+1,679X_2+2,356X_4\leq 6; \\ &30\leq 608,2+1,235F_1-0,1552F_2+2,823F_5-4,354F_7-59,09F_8+7,84X_1-13,29X_4\leq 80; \\ &-1,148F_1-0,1294F_2+1,961F_4-1,502F_5+1,074F_6+1,78F_8-1,782X_2+0,4177X_3\leq 120; \\ &Q_{\min}\leq -364,4F_4-1022F_6+4107X_1-105X_3+2417X_4\leq Q_{\max}; \\ &2,5\leq X_1\leq 4,5; 5\leq X_2\leq 12; X_3\leq 150; X_4\leq 40; X_j\geq 0. \end{aligned}$$

За допомогою симплексного методу знайдено енергоефективні регулюємі параметри процесу сушіння торфу для кожного проведеного дослідження.

Продуктивність торфобрикетного заводу визначається ринковими умовами. Тому здійснення регулювання завантаженості пропонується за трьома режимами – з мінімальним значенням керуючого параметру $X_1=2,5$ об/хв, середнім значенням $X_1=3,5$ об/хв та максимальним $X_1=4,5$ об/хв, для яких визначається мінімальне електроспоживання.

У четвертому розділі побудовано нейронну мережу зі структурою та функціями активації, що дозволяє визначити оптимальні значення керуючих параметрів за значень збурюючих впливів, змінних у часі.

Навчений на експериментальних дослідженнях персептрон дозволяє реалізувати вирішення задачі «вхід-вихід», тобто, при надходженні нових значень збурюючих впливів він дозволяє прорахувати нові оптимальні керуючі впливи. Для знаходження оптимальних режимних параметрів енерготехнологічного процесу сушіння торфу за допомогою нейронних мереж необхідно зібрати достатній і представницький обсяг даних, щоб навчити нейронну мережу вирішенню цього завдання. Внаслідок недостатності для цього даних проведених активних експериментів вони були доповнені шляхом здійснення генерації додаткових випадкових наборів збурюючих впливів на процес за методом Монте-Карло.

Для знаходження оптимальної структури нейромережі, а саме – необхідної кількості прихованих нейронів, функції активації прихованих та вихідних нейронів проведено тренування сукупності моделей для знаходження оптимальних керуючих параметрів у середовищі пакету Statistica Neural Network. Аналіз отриманих нейронних мереж проводився за значеннями продуктивностей по навчальній, тестовій вибірці та середньоквадратичній похибці на даних вибірках. Вибрана структура нейронних мереж представлена в табл. 3, де MLP 8-12-3 – багатошаровий персептрон з 8 входами, 3 виходами та 12 прихованими шарами.

Таблиця 3

Результати знаходження структури нейронних мереж моделей процесу сушіння торфу за оптимальних по критерію енергозбереження керуючих параметрів

Значення X_1	Назва мережі	Кількість епох	Функція активації прихованих шарів	Функція активації вихідного шару
2,5	MLP 8-12-3	54	Логістична	Експоненціальна
3,5	MLP 8-12-3	208	Логістична	Логістична
4,5	MLP 8-11-3	114	тангенціальна	Експоненціальна

У реальних умовах змінити відразу існуючі значення керуючих впливів на оптимальні, що задовольняють умовам мінімуму споживання енергії та якості

отриманої сушенки, не завжди можливо. Складність зміни керуючих впливів, які встановлені для торфу доставленого попередньою вагонеткою, на нові пояснюється інерційністю енерготехнологічного процесу сушіння, оскільки швидка зміна одного з керуючих параметрів призводить до виходу неякісної сушенки, що знаходиться в барабані сушарки на момент переходу роботи сушарки на нові режимні параметри.

Для зменшення впливу зміни керуючих впливів на процес сушіння за зміни збурюючих впливів проведено розпізнавання і класифікацію виробничих ситуацій та згідно з цим підібрано значення керуючих впливів. Ситуації було розбито на 4 класи у діапазоні мінімальних та максимальних значень витрат електричної енергії. Для кожного класу зафіксовано діапазон зміни керуючих впливів X_2^* , X_3^* , X_4^* , де X_k^* – оптимальне значення k -того керуючого впливу.

Визначення та віднесення виробничої ситуації до відповідного класу здійснювалось за допомогою методу дискримінантного аналізу. Канонічне рівняння дискримінантної функції представлено у вигляді:

$$S_{km} = u_0 + u_1 X_{2km} + u_2 X_{3km} + \dots + u_{11} F_{8km}, \quad (13)$$

де S_{km} – величина (оцінка) канонічної дискримінантної функції для випадку (режиму) m до групи k ; X_{ikm} та F_{ikm} – значення керуючих параметрів X_i та збурюючих впливів F_i для випадку (режиму) m у необхідній групі k ; u_0, \dots, u_{11} – коефіцієнти дискримінантної функції.

За квадратом відстані Махаланобіса кожної вибірки до центру кожного з класів виробничих ситуацій робився висновок щодо точності визначення приналежності певної вибірки до одного із чотирьох класів виробничих ситуацій. Відстань Махаланобіса визначається як міра відмінності між двома випадковими векторами з рівними розподілами:

$$D_M(x) = \sqrt{(x - \mu) S^{-1} (x - \mu)^T}, \quad (14)$$

де x – деякий вектор спостережень, $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_N)$ – множина із середнім значенням, S – матриця коваріації

Запропоновано метод визначення набору необхідних значень керуючих параметрів X_k^{**} , що для знайдених значень збурюючих впливів F_k відповідав би певному класу ситуації $\{X_k^{**}; F_k\} \in K_n$, де $n=1, \dots, 4$, знайденому за умови визначення оптимальних значень керуючих впливів X_k^* при збурюючих впливах F_k .

Процедура здійснення регулювання енерготехнологічного процесу сушіння торфу в енергоефективних режимах:

1. Перед запуском сушарної установки визначаються фізико-механічні властивості торфу ($N=1$, де N – номер виміру збурюючих впливів) з вагонетки, торф якої спочатку подається в сушарку (F_{1i} , F_{2i} , F_{3i} , F_{4i} , F_{5i} , F_{6i} , F_{7i} , F_{8i} , де i -номер ітерації алгоритму встановлення значень оптимальних значень параметрів виробничих ситуацій). Потім оператором у залежності від поставлених цілей щодо продуктивності сушарної установки, встановлюється необхідне значення параметра X_{1i} . За допомогою багатосарового персептрона для вирішення задачі визначення оптимальних енергозберігаючих параметрів керуючих впливів у залежності від значень збурюючих впливів визначаються необхідні величини параметрів X_{2i}^* , X_{3i}^* , X_{4i}^* , що встановлюються на виробництві (X_{2i} , X_{3i} , X_{4i}). За допомогою проведеного

дискримінантного аналізу встановлюється, до якої дискримінатної функції максимально наближена дана виробнича ситуація, і визначається клас ситуації K_i^* .

2. Вимірювання техніко-фізичних властивостей на даний час на торфобрикетному заводі здійснюються для кожного вагона. Після здійснення нових вимірювань $N=2$ ($F_{1i+1}, F_{2i+1}, F_{3i+1}, F_{4i+1}, F_{5i+1}, F_{6i+1}, F_{7i+1}, F_{8i+1}$) визначаються оптимальні енергоефективні значення керуючих впливів ($X_{2i}^*, X_{3i}^*, X_{4i}^*$) за допомогою штучних нейронних мереж, та за допомогою дискримінантного аналізу визначається клас виробничої ситуації. Якщо клас нової виробничої ситуації K_{i+1}^* відповідає класу визначеному і встановленому для першого вагону торфу K_i^* , то встановлені на виробництві значення керуючих впливів процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках залишаються незмінними (X_{2i}, X_{3i}, X_{4i}), і робота сушарного комплексу триває з цими значеннями. Якщо виробнича ситуація не буде належати до класу попередньої ситуації на виробництві, то здійснюється визначення керуючих впливів, що наближаються до оптимальних і дозволяють отримати виробничу ситуацію відповідно до визначеного нового класу ситуації.

3. Встановлення значення $X_{4(i+1)}$ – швидкість обертання димососу – найбільшого споживача енергії серед електричних машин комплексу відповідно до значень необхідного класу. Тобто, встановлюється X_{4i+1} , яке знаходиться найближче до області необхідного класу K_{i+1}^* ($X_{4i+1} \in K_{i+1}^*$).

4. У разі зміни витрати сушильного агента в сушарці визначається достатнє значення питомих витрат теплової енергії для підігрівання сушильного агенту q_2 , оскільки змінилась питома витрата сухого повітря l . Для цього визначаються питомі витрати теплоти на підігрівання сушильного агенту від вихідної температури t_0 до кінцевої t_2 та мінімально допустимі значення питомих витрат теплоти на випаровування q . Розрахунок мінімального значення q для енерготехнологічного процесу сушіння торфу проводиться для параметрів $F_5, F_4, F_3, F_1, X_4, Y_1, Y_3, Y_5$. Для кожної виробничої ситуації, параметр X_4 має значення відповідне X_{4i+1} . Значення Y_1 вибирається на максимально допустимому рівні; Y_5, Y_3 – на мінімально допустимих рівнях відповідно до вимог виробництва задля отримання сушенки необхідної якості та пожежобезпеки за мінімального значення q . Здійснивши підстановку отриманих значень параметрів $F_{1i+1}, F_{3i+1}, F_{4i+1}, F_{5i+1}, X_{4i+1}, Y_{1max}, Y_{3min}, Y_{5max}$ в рівняння згідно аналітичного розрахунку процесу сушіння торфу, отримуємо значення q_{min} за яким знаходиться значення мінімальної витрати теплової енергії Y_{8i} для виробничої ситуації $\{F_{1i+1}, F_{2i+1}, F_{3i+1}, F_{4i+1}, F_{5i+1}, F_{6i+1}, F_{7i+1}, F_{8i+1}, X_{2i}, X_{3i}, X_{4i+1}\}$.

5. З математичної моделі теплоспоживання Y_8 отриманої за допомогою МГУА, визначено значення температури пари (X_3):

$$X_3 = -3,47048F_4 - 9,73333F_6 + 39,11429X_1 + 23,01905X_4 - 0,00952Y_8 \quad (15)$$

Здійснивши підстановку значень $F_{4i+1}, F_{6i+1}, X_{4i+1}, Y_{8i}$, знаходиться значення керуючого впливу X_{3i+1} .

6. Встановлюється, до якої дискримінатної функції найбільш наближена дана виробнича ситуація $\{F_{1i+1}, F_{2i+1}, F_{3i+1}, F_{4i+1}, F_{5i+1}, F_{6i+1}, F_{7i+1}, F_{8i+1}, X_{2i}, X_{3i+1}, X_{4i+1}\}$ і визначається клас ситуації K_{i+2} . Якщо клас K_{i+2} відповідає класу K_{i+1}^* , то для другого виміру фізико-механічних властивостей $N=2$ встановлюються значення керуючих впливів $X_{2i}, X_{3i+1}, X_{4i+1}$. Якщо ні, то необхідно змінити значення параметра X_2 .

7. Згідно з даними результатів класифікації виробничих ситуацій за значеннями мінімальної витрати електричної енергії на процес сушіння торфу, середнє значення швидкості обертання сушарки (X_2) збільшується з 1 до 4 класу. Проте певне значення параметру X_2 може належати трьом і навіть чотирьом класам. Тому значення параметра X_{2i} може належати необхідному класу K_{i+1}^* ($X_{2i} \in K_{i+1}^*$). В такому разі підбираються значення X_{2i+1} з певним кроком у напрямку до середнього значення необхідного класу. Більш точне значення отримується шляхом побудови математичної функції зміни значення параметра X_2 відповідно до значень збурюючих впливів F_k та оптимальних керуючих впливів X_3^* , X_4^* , при певному значенні параметра X_1 , $X_2=f(F_k; X_3^*, X_4^*)$ за допомогою методів МГУА.

8. Після знаходження нового значення параметра X_{2i+1} необхідно для виробничої ситуації $\{F_{1i+1}, F_{2i+1}, F_{3i+1}, F_{4i+1}, F_{5i+1}, F_{6i+1}, F_{7i+1}, F_{8i+1}, X_{2i+1}, X_{3i+1}, X_{4i+1}\}$ визначити клас K_{i+2} . Якщо знайдений клас K_{i+2} відповідає необхідному класу K_{i+1}^* , то на виробництві встановлюються значення керуючих параметрів, які відповідають X_{2i+1} , X_{3i+1} , X_{4i+1} . Якщо ні, то алгоритм пошуку значень керуючих параметрів для певної виробничої ситуації продовжується.

9. Надалі проводиться зміна значення параметру X_{4i+1} в напрямку до середнього значення відповідного класу з кроком ($\Delta=\pm 0,001$).

10. Далі згідно із п.4-п.9 відбувається пошук необхідних значень $X_2^{**}, X_3^{**}, X_4^{**}$, що відповідають необхідному класу K_{i+1}^* .

Схема наведеного методу представлена на рис. 4.

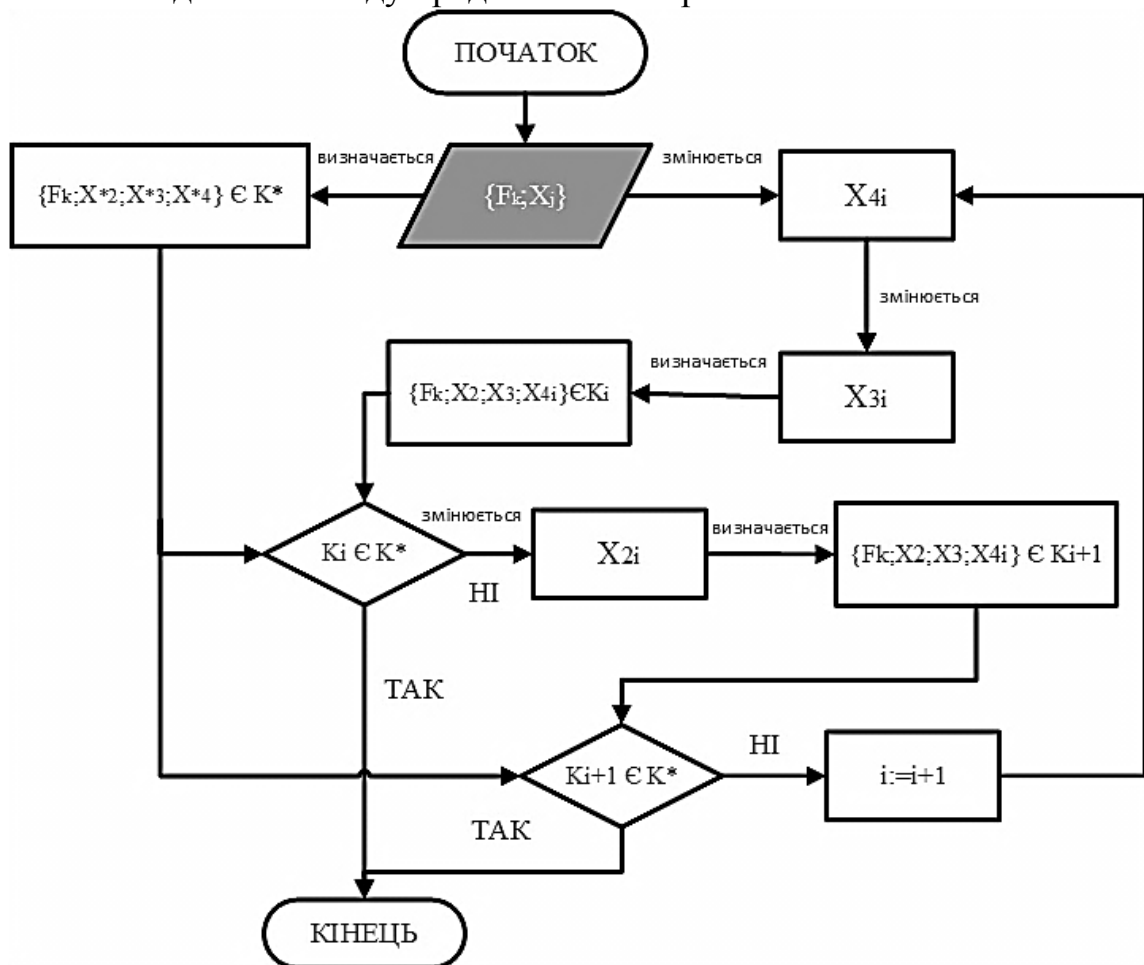


Рис. 4. Схема методу проведення регулювання процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці торфу в енергоефективних режимах

В дисертаційній роботі запропоновано структуру системи автоматичного регулювання сушарки у вигляді двох контурів – контур контролю і регулювання витрат теплової енергії та контур регулювання швидкості обертання барабана сушарки. Фактичне значення витрат теплової енергії повинно знаходитись в межах мінімального та максимального значень. Якщо у разі зміни збурюючих впливів (температури, вологості, зольності торфу тощо) витрати теплової енергії менші за мінімальне або більші за максимальне значення, то необхідно збільшити або зменшити подачу теплової енергії в сушарку та (або) витрату повітря через сушарку. Подальша компенсація впливів збурюючих факторів відбувається завдяки зміні частоти обертання барабана.

Оскільки апаратна реалізації нейронних мереж на ПЛІС перед програмним володіє такими перевагами, як швидкість (збільшується за рахунок апаратної реалізації паралельних обчислень), надійність (ймовірність відмови апаратури менша вірогідності збою програми), безпечність (захист авторських прав) тощо, то реалізація процедури класифікації та розпізнавання виробничих ситуацій процесу сушіння торфу було здійснено на пристроях FPGA фірми Altera Cyclone IV.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено обґрунтування і нове вирішення наукової задачі, що полягає в розробленні методів підвищення ефективності використання енергоресурсів енерготехнологічним комплексом сушіння торфу за рахунок оптимального використання теплової та електричної енергії, необхідної для отримання сушенки регламентованої якості, що дозволяє підвищити ефективність функціонування брикетних заводів.

Основні висновки і результати полягають у наступному:

1. Аналіз факторного поля енерготехнологічного комплексу сушіння торфу, що є складовою процесу оптимізації виробництва, який впливає на режим роботи, показав, що існує понад 30 факторів, які впливають на процес сушіння та дозволив виділити вектори регульованих, збурюючих впливів і цільових параметрів моделі процесу. Для зменшення числа факторів та виділення найбільш вагомих з них, що впливають на техніко-економічні показники процесу, застосовано метод експертного оцінювання.

2. Розроблений план активних виробничих експериментів забезпечив проведення мінімально-необхідної кількості дослідів в умовах торфобрикетного виробництва, з урахуванням меж змін факторів, встановлених відповідно до режимної карти процесу сушіння, що дозволило отримати достатню кількість даних для побудови математичної моделі енерготехнологічного процесу сушіння торфу.

3. У роботі отримано цільові функції математичної моделі роботи енерготехнологічного комплексу сушіння торфу за допомогою методів індуктивного моделювання, що дозволило виключити з кожної із функцій фактори, що практично не спричиняють впливу на вихідний параметр. Відбір факторів для математичної моделі дозволив знайти модель оптимальної складності, для якої перенавчання мінімальне, та дозволив зменшити загальну похибку моделі, оскільки кожна ознака має свою вимірну похибку. Для вирішення задачі розроблено процедуру вибору адекватної математичної моделі процесу, знайденої за певним алгоритмом

навчання методу еволюції груп адаптивних моделей штучного інтелекту, що дозволяє знайти оптимальні значення керуючих параметрів процесу сушіння для забезпечення роботи сушарної установки в енергоефективних режимах.

4. Розроблено багатомірну оптимізаційну модель споживання енергії, що дозволяє здійснювати знаходження енергоефективних режимів сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою за фактичних фізико-механічних властивостей торфу, з дотриманням вимог щодо якості сушенки та забезпечення пожежобезпеки. Для мінімізації споживання енергії в процесі сушіння запропоновано спочатку здійснювати визначення мінімальної необхідної кількості теплоти для сушіння торфу певних фізичних і механічних властивостей, а потім знаходити оптимальні за критерієм енергоефективності значення регульованих параметрів із використанням електроспоживання в якості цільової функції, а функції теплоспоживання, якості сушенки та забезпечення пожежобезпеки як обмежень до даної функції.

5. Розроблена нейронна мережа знаходження енергоефективних значень керуючих параметрів процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою, що дає можливість оперативного визначення оптимальних за енергоефективністю значень всіх регульованих параметрів у режимі реального часу. Знайдені мережі моделей мають найменші середньоквадратичні похибки на контрольній, тестовій та тренувальних вибірках та оптимальні значення продуктивностей.

6. Проведено класифікацію виробничих ситуацій за значеннями мінімального споживання електричної енергії, визначено дискримінантні функції для розпізнавання існуючої в певний момент сушіння ситуації та віднесення її до необхідного класу і запропоновано алгоритм здійснення керування процесом сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою в енергоефективних режимах в межах відповідного класу, що дозволило зменшити кількість неякісної сушенки на виході процесу сушіння. Керування за розробленим алгоритмом дозволило зменшити електромісткість сушенки на понад 0,3 кВт·год/т сушенки, а енергомісткість на 25 кДж/т сушенки.

ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Kulakovskiy L. Optimal Operation of the Peat Drying Process in Steam Tube Dryers / Leonid Kulakovskiy, Victor Rosen, Roshan Sharma, Carlos Pfeiffer, Bernt Lie // Linköping University Press. – 2015. – P. 31-41. *(закордонна публікація, що включена до бази даних CrossRef.)*

2. Розен В.П. Розробка алгоритму побудови факторного поля процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках / В.П. Розен, Л.Я. Кулаковський // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – Вип. 3 – С. 63-68. *(включено до бази даних РІНЦ.)*

3. Кулаковський Л.Я. Побудова нейронної мережі моделі процесу сушіння торфу в парових сушарках в енергозберігаючих режимах / Л.Я. Кулаковський, В.П. Розен // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2015. – Вип. 3 (41). – С. 55-58. *(включено до баз даних РІНЦ, «WorldCat».)*

4. Чернявський А.В. Виділення сукупності факторів впливу на енергетичні та якісні показники процесу сушіння піску в сушарці барабанного типу / А.В. Чернявський, О.М. Проскуріна, Л.Я. Кулаковський // Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія: “Електротехніка і енергетика”. – Донецьк. – 2014. – Вип. №1 (16). – С. 231-238.

5. Кулаковський Л.Я. Формування факторного поля для експериментальних досліджень парової трубчатої сушарки торфу / Л.Я. Кулаковський, Є.І. Алтухов // Вісник Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут». – 2014. – Вип. 1. – С. 34-41. – (Серія : Гірництво).

6. Розен В.П. Алгоритм вибору методу навчання нейромереж типу GAME для побудови математичної моделі процесу сушіння торфу в сушарках Цемаг / В.П. Розен, Л.Я. Кулаковський // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – Вип. №. 4. – С. 53-60.

7. Кулаковський Л.Я. Енергоефективна система автоматичного управління процесом сушіння торфу в парових трубчатих сушарках / Л.Я. Кулаковський // Вісник інженерної академії України. – 2015. – Вип. №2. – С. 29-33.

8. Кулаковский Л.Я. Повышение энергоэффективности процесса сушки торфа в паровых трубчатых сушилках с помощью распознавания и классификация производственных ситуаций / Л.Я. Кулаковский, Е.И. Алтухов, В.П. Розен // Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы трудов XIX Всероссийской научно-технической конференции. Томский политехнический университет, 4-6 декабря 2013 – Томск: Изд-во ООО «Скан», 2013. – С. 228-230.

9. Кулаковський Л.Я. Планування виробничих експериментів для багатофакторного дослідження технології сушіння торфу в парових трубчатих сушарках / Л.Я. Кулаковський, Є.І. Алтухов // Енергетика та системи керування: матеріали III Міжнар. наук. конф. молодих вчених ERECS-2013. – Львів : Львівська політехніка, 2013. – С. 70–72.

10. Розен В.П. Розробка методики визначення факторного поля процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках / В.П. Розен, Л.Я. Кулаковський // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції “Енергетична безпека навколишнього середовища” – Луцьк: РВВ Луцького національного технічного університету, 2013. – С. 24-26.

11. Кулаковський Л.Я. Знаходження за допомогою МГУА математичної моделі процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках / Л.Я. Кулаковський, В.П. Розен // Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об’єктів. Збірник наукових праць I Міжнародної науково-технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів: 17-18 жовтня 2013 р., м. Донецьк: «ДВНЗ» ДонНТУ, 2013. – С. 131-134.

АНОТАЦІЯ

Кулаковський Леонід Ярославович. Підвищення енергоефективності енерготехнологічного комплексу сушіння на торфобрикетному виробництві. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси, Національний

технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2017.

У роботі розв'язано важливу наукову і практичну задачу підвищення рівня енергоефективності використання енергоресурсів технологічним комплексом сушіння. Сутність розв'язання проблеми полягає в розробленні методу регулювання режимів роботи сушарного комплексу, що дозволяє отримати сушенку необхідної якості за мінімальних витрат енергії.

Для досягнення цієї мети проведено аналіз факторного поля енерготехнологічного процесу сушіння торфу та визначено сукупність факторів, які впливають на техніко-економічні показники процесу. За результатами експериментальних досліджень проведено статистичний та кореляційний аналіз, що дозволило виділити основні взаємозв'язки факторів у моделі. Для вирішення задачі відбору факторів для кожної цільової функції енерготехнологічного процесу сушіння та знаходження адекватної математичної моделі застосовано метод еволюції груп адаптивних моделей. Розроблено процедуру вибору цільових функцій математичної моделі енерготехнологічного процесу сушіння торфу, знайдених за допомогою різних алгоритмів навчання. Знаходження оптимальних значень керуючих параметрів за критерієм енергоефективності здійснено симплексним методом. Знайдено структуру та параметри нейронної мережі, що дозволяє для фактичних значень збудовуючих впливів процесу сушіння визначити оптимальні за критерієм енергоефективності значення керуючих параметрів.

Для подолання труднощів різкої зміни значень керуючих параметрів при переході на нові оптимальні значення процесу сушіння зі зміною збудовуючих впливів, які призводять до отримання недосушеної або пересушеної сушенки, здійснено класифікацію і запропоновано метод попереднього розпізнавання виробничих режимів за допомогою дискримінантного аналізу. На основі проведених досліджень розроблено метод регулювання процесу сушіння, який ґрунтується на визначенні необхідного класу режиму регулювання для фактичних значень збудовуючих впливів та підборі і встановленні значень керуючих параметрів, які належать до знайденого класу.

Ключові слова: режими сушіння, парова трубчаста сушарка, нейронна мережа, математична модель, метод еволюції груп адаптивних моделей, навчання.

АННОТАЦИЯ

Кулаковский Леонид Ярославович. Повышение энергоэффективности энерготехнологического комплекса сушки на торфобрикетном производстве. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2017.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи – формирования методов повышения эффективности использования энергоресурсов энерготехнологических комплексов сушки торфа за счет обеспечения работы сушильного оборудования согласно оптимальным по энергозатратам значениям

регулируемых параметров с учётом возмущающих воздействий при получении сушенки необходимого качества и удовлетворении требований пожаробезопасности.

Для нахождения оптимальных значений регулирующих параметров по критерию энергоэффективности проанализировано факторное поле процесса сушки, выделены основные факторы, существенно влияющие на энергоэкономические показатели энерготехнологического процесса сушки торфа в паровых трубчатых сушилках и получена математическая модель процесса. Математическая модель найдена при помощи метода группового учета аргументов (МГУА).

Как показали результаты нахождения модели методом МГУА, используя только один метод индуктивного моделирования, построить адекватную модель процесса сушки торфа затруднительно. Для получения более точных моделей (со среднеквадратической погрешностью воспроизведения целевых функций модели меньше 0,01), описывающих процесс сушки, использовались гибридные самоорганизующиеся нейросети эволюционного типа – эволюции групп адаптивных моделей (ЭГАМ). Среди моделей, полученных разными оптимизационными методами, выбрана модель, наиболее удовлетворяющая критериям отбора признаков, а полученные модели позволяют наиболее точно определить оптимум целевых функций процесса сушки торфа в паровых трубчатых сушилках. Для выбора адекватной математической модели целевых функций энерготехнологического процесса сушки торфа, найденного разными алгоритмами обучения методом ЭГАМ, разработан критерий не вхождения значимых факторов в модель и соответствующая процедура их выбора по минимуму данного критерия. Нахождение оптимальных значений регулируемых параметров по критерию энергоэффективности осуществлялось симплексным методом.

Система управления, в которой для определенных значений возмущающих воздействий устанавливаются оптимальные значения регулируемых возмущений, реализована в модели нейронной сети. Для качественного обучения сети произведена генерация случайных значений возмущающих воздействий и нахождение оптимальных значений регулирующих параметров при сгенерированных возмущениях процесса. Найдена оптимальная структура, алгоритм обучения и функции активации нейронной сети типа персептрон. Также разработана система мониторинга затрат тепловой энергии, основанная на анализе расхода теплоты в единицу времени и удельных расходов теплоты на испарение единицы влаги из торфа, которая позволяет подобрать энергоэффективные уровни потребления топливно-энергетических ресурсов.

Для минимизации резкого изменения управляющих воздействий на процесс сушки при изменении возмущающих воздействий предложено производить распознавание и классификацию производственных ситуаций с помощью дискриминантного анализа и в соответствии с этим определять управляющие воздействия. Найдены канонические дискриминантные функции позволяют отнести режим к необходимому классу. О достаточной точности отнесения свидетельствуют результаты расчёта апостериорной вероятности, расстояния Махаланобиса и анализ классификационной матрицы.

Представленный в диссертационной работе метод повышения эффективности использования энергоресурсов в паровой трубчатой сушилке позволяет уменьшить не только энергозатраты процесса, но и вероятность получения некачественной сушенки, а также повысить пожаробезопасность производства.

Ключевые слова: режимы сушки, паровая трубчатая сушилка, нейронная сеть, математическая модель, метод эволюции групп адаптивных моделей, обучение.

SUMMARY

Kulakovskiy L.Ya. Increasing energy efficiency of energotechnological drying complex of peat briquettes production. – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.14.01 – Energy Systems and Complexes, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The paper contains solutions of scientific and practical issues for increasing energy efficiency of peat drying process in tube steam driers.

Thoroughness of the solution consists in developing a method of drying peat regimes. That method should allow to dry peat to the required quality by the lowest consumption of energy. To achieve this, the analysis of drying peat factors was carried out and set of factors that have influence to the technical and economic parameters of the process was defined.

In order to develop mathematical dependencies of changes of the target or output functions due to changes in the input variables, the active experiments were conducted. It was found that some features could be affected by noise during the investigation of peat drying process in steam tube dryer. The problem of features selection was resolved by using Group of Adaptive Model Evolution method. The procedure of selection models obtained from different optimization methods by solving feature's selection criteria was developed. The values of control parameters were found by using simplex method. These parameters satisfy the criteria for energy efficiency.

The number of experiments on the peat plant was limited, so there were only few data sets for getting accurate models that calculate outputs by using neural network. That is why in order to increase data set it is necessary to create a synthetic data. It was used the Monte Carlo method for generating new data set. Then there were found the structure and characteristic of neural network that solve the task of searching optimal control parameters of peat drying process.

It was used a classification algorithm for classifying the data into a number of optimal operational regimes by using the experimental data, possibly extended with synthetic data. Classification functions obtained using discriminant analysis, can be classified with sufficient accuracy to the required sample class. After classifying and recognizing industrial regimes an algorithm for operating the peat drying process was developed.

Keywords: drying regimes, steam tube dryer, neural network, mathematical model, Group of Adaptive Model Evolution method, training.

